

# Ökologische Bedeutung von Feststoffen und gewässermorphologischen Strukturen im Nahbereich von Kleinwasserkraftwerken

Christoph Hauer · Wolfgang Obruca · Beatrice Wagner · Helmut Habersack

Online publiziert: 20. Oktober 2016

© Der/die Autor(en) 2016. Dieser Artikel ist eine Open-Access-Publikation.

**Zusammenfassung** Neben einer Unterbrechung des Längskontinuums für die Migration aquatischer Organismen kommt es durch Laufkraftwerke zu einer bedeutenden Störung des longitudinalen Feststofftransports. In dieser Arbeit werden sowohl die generellen Aspekte und Auswirkungen einer Veränderung der Feststoffdynamik durch den Kraftwerksbetrieb erläutert, es wird aber auch detailliert auf die Problematik einer Beeinflussung des Feststofftransports bei Kleinwasserkraftwerken eingegangen. Ziel des vorliegenden Fachbeitrags ist es, die ökologische Bedeutung von Feststoffen und gewässermorphologischen Strukturen im Nahbereich von Kleinwasserkraftwerken aufzuzeigen. Es werden sowohl die notwendigen Grundlagenhebungen (Messungen und Modellierungen) für wasserbauliche Maßnahmenplanungen beschrieben, als auch konkret die Möglichkeiten zur naturnahen/technischen Optimierung angesprochen. Vor allem auf die eigendynamische Entwicklung von Kieslaichplätzen im Nahbereich dieser technischen Anlagen zur Wasserkraftnutzung wird im Detail eingegangen. Die Möglichkeiten zur Laichplatzentwicklung, welche im Zuge umfangreicher Feldarbeiten validiert wurden, zeigen, dass sich im und durch den Einflussbereich von Kleinwasserkraftwerken mitunter Kieslaichplätze entwickeln können. Die Bedeutung von strukturellen Aufwertungen von Kleinwasserkraftanlagen

wurde ebenfalls über die Kartierung der Laichplatznutzung von Bachforelle und Regenbogenforelle mit in die Diskussion zukünftiger, ökologisch orientierter Verbesserungsmaßnahmen aufgenommen.

## Schlüsselwörter

Feststoffmanagement · Kleinwasserkraft · Kieslaichplätze · Salmoniden

## Ecological importance of sediments and morphological structures for small hydropower plants

**Abstract** In addition to interrupting or disturbing the longitudinal continuum for the migration of aquatic organisms, run-of-river plants also represent significant impacts for the sediment transport in a river.

In the following paper, general aspects of changes and disturbances in sediment dynamics due to the operation of hydropower plants are explained.

The aim of this work is to reveal the ecological significance of sediments and freshwater-morphological structures in the vicinity of small hydropower plants. Referring to this, we describe the technical efforts (measurements and modeling) required for the planning of river engineering measures, and we further address detailed possibilities for near-natural/technical optimization.

Above all, we discuss the possibilities for self-forming gravel spawning habitats in the vicinity of hydroelectric plants in detail. The various forms of salmonid spawning sites, which were validated in the course of extensive fieldwork, show that reproduction sites could evolve even in areas influenced by small hydropower plants.

Moreover, by mapping spawning redds of brown trout and rainbow trout, the importance of structural improvements at small hydropower plants is integrated into the discussion on future, ecologically oriented improvement hydraulic engineering measures.

**Keywords** Sediment management · Small hydropower plants · Gravel spawning beds · Salmonidae

## 1 Feststoffhaushalt und Sedimentdurchgängigkeit bei Kraftwerken

Die Bedeutung des Feststoffhaushalts und der Sedimentdurchgängigkeit ist vielseitig und wurde bereits in diesem Heft in Bezug auf den Naturnahen Wasserbau in den Beiträgen Hauer et al. (2016) und Höfler et al. (2016) erläutert. Aus flussmorphologischer Sicht sind der Transport, die Umlagerung und Sedimentation sowie Remobilisierung von Feststoffen im Flussschlauch und der Austausch (Ein- und Austrag) mit den Vorländern natürliche Phänomene eines sich im dynamischen Gleichgewicht befindenden Fließgewässers.

Anthropogene Eingriffe in den Feststoffhaushalt, wie z. B. eine Einschränkung des Sedimenttransports durch Querbauwerke (Verringerung bis Unterbindung des Sedimentkontinuums), führen zu einer zunehmenden Beeinflussung des Flusssystems. Eine Unterbrechung des Längskontinuums durch Wehranlagen von Laufkraftwerken kann langfristig negative Auswirkungen wie z. B. Sohlintiefungen flussab der Wehre mit sich ziehen (BMLFUW 2010). Die kontinuierliche Eintiefung der Donausohle östlich von Wien zeigt z. B. die Problematik. Trotz Zugabe von Kies durch Verbund-AHP (im Mittel ca. 200.000 m<sup>3</sup> pro Jahr) liegt der mittlere Materialaustrag pro Jahr bei 360.000 m<sup>3</sup> (Strom-km 1880,0 bis 1921,0). Das feh-

Priv.-Doz. DI Dr. C. Hauer (✉) ·  
W. Obruca · DI B. Wagner ·  
Univ.-Prof. DI Dr. H. Habersack  
Department für Wasser –  
Atmosphäre – Umwelt, Institut für  
Wasserwirtschaft, Hydrologie  
und konstruktiven Wasserbau,  
Universität für Bodenkultur Wien,  
Muthgasse 107, 1190 Wien, Österreich  
christoph.hauer@boku.ac.at

lende Gleichgewicht zwischen Ein- und Austrag von Feststoffen in und aus der Staustrecke führt, kombiniert mit Auswirkungen der Regulierung und einer rückschreitenden Erosion, trotz Zugabe zu einer Sohlerosion von ca. 2 cm im Jahr (Mittelwert 2005 bis 2009, Habersack et al. 2009). In Abhängigkeit von den geologischen Rahmenbedingungen können aber neben den hier angesprochenen Auswirkungen des Sedimentdefizits auch Probleme durch Sedimentüberschuss auftreten (siehe Hauer et al. 2016, in diesem Heft).

Neben den wasserbaulichen Aspekten eines erhöhten Erosions- bzw. Versagensrisikos von Bauwerken, die im Bereich von Böschungen/Sohle fundieren, ist das fehlende Sedimentkontinuum im alpinen Raum als wesentlich für die Verschlechterung des ökologischen Zustandes der betroffenen Fließgewässer anzusehen (weniger Sedimenteintrag führt zu einem Sedimentdefizit der betrachteten Strecke, in weiterer Folge zu Eintiefungstendenzen, Verlust dynamischer Schotterbän-

ke und Gewässerstrukturen und einer Verschlechterung z. B. der Laichplatzqualität). An der Donau östlich von Wien drohen negative ökologische Folgen für den Nationalpark Donau-Auen (Absinken des Grundwasserspiegels, Entkopplung Au-Flusssohle, Trockenlegung der Seitenarme etc.; Habersack et al. 2014). Maßnahmen wie z. B. Gewässeraufweitungen oder Maßnahmen zur Geschiebemanagement fördern Annäherungen des Feststofftransports an die natürlichen Verhältnisse. Dadurch können etwaige Sohleintiefungen, Bauwerksunterspülungen im Unterwasser, Gefährdungen von wertvollen Bauwerken wie Brückenpfeilern oder ufernahen Infrastruktureinrichtungen verhindert werden.

Langfristige negative Entwicklungen im Bereich der Morphologie sowohl durch Eintiefung im alpinen Bereich als auch Auflandung in den Fließgewässern der Böhmisches Masse haben die bereits angesprochenen problematischen Folgen für den Hochwasserschutz (z. B. dass die Verwerfungsgefahr infolge

nicht mehr ausreichend stabiler Ufersicherungen größer wird). Andererseits prägen Hochwässer sehr wesentlich die Flussmorphologie in naturnahen Strecken und führen zu starken morphodynamischen Veränderungen. Das bedeutet, dass Maßnahmen zur Verbesserung des ökologischen Zustandes nicht unabhängig vom hydromorphologischen Gesamtzustand des Flusses bzw. von der Hochwasserdynamik ausgewählt und geplant werden können. Ein Hochwasser kann ausreichen, dass sich der kurzfristig biologisch festgestellte Erfolg von nicht ausreichend überlegten Rückbaumaßnahmen zur Verbesserung des ökologischen Zustandes ins Gegenteil verkehrt (Hauer et al. 2008).

In der WRRL wird im sehr guten Zustand auch das Sedimentkontinuum angesprochen. Für den guten Zustand muss es (wie auch andere Parameter betreffend) insofern „intakt“ sein, als von der Biologie der nachhaltige gute Zustand gefordert wird. Grundsätzlich wird die flussmorphologische Situati-

## Feststoffproduktion

KWKW-Standorte Österreich (Geologie, Höhenlage,...)

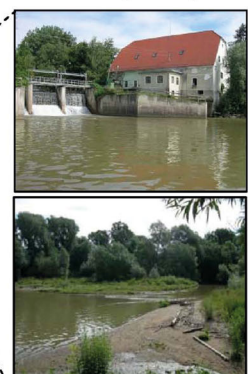
Voralpen (Alm)



Böhmisches Masse (Gr. Mühl)



Tiefland (Raab)



Bodenabtrag

➡ Einzugsgebietsbezogene Unterschiede bestehen

**Abb. 1** Darstellung der Topografie Österreichs in Verschneidung mit GIS-Standorten der Wasserkraftwerke Österreichs (gesamt 5240 Kraftwerke; Habersack et al. 2011); hervorgehoben sind Unterschiede an Kleinwasserkraftstandorten hinsichtlich geomorphologischer und sedimentologischer Eigenschaften

on eines Wasserkörpers (meist lokale Ebene) von der Streckenebene (Gewässerstrecke) und darüber dem Einzugsgebiet hierarchisch bestimmt (Hauer 2015). Damit ist eine grundsätzliche Betrachtung des Feststoffhaushalts und der Flussmorphologie im Flussgebietsbewirtschaftungsplan essenziell für eine nachhaltige Planung und Umsetzung von Rückbaumaßnahmen zur Erreichung eines guten ökologischen Zustandes, aber auch zum langfristigen Erhalt desselben (vgl. auch König und Hauer 2016, in diesem Heft).

Neben dem Problem des oft fehlenden Sedimentkontinuums führen sowohl bei (Pump-)Speicherkraftwerken als auch bei Laufkraftwerken Ablagerungen von Sedimenten im Stauraum zu einer Reduzierung des Stauraumvolumens (De Cesare et al. 2001; Schleiss et al. 2010). Dies führt zu Einschränkungen der energiewirtschaftlichen Produktion bzw. bei Laufkraftwerken zu einer Reduktion der Abfuhrkapazität und somit zu einer Erhöhung des Risikos von monetären Schäden im Falle von außergewöhnlichen Hochwasserereignissen. Die Menge der eingetragenen Feststoffe ist von einer Vielzahl an Faktoren abhängig (geologisches Einzugsgebiet, Lage des Kraftwerks etc.; s. Abb. 1). Während bei Laufkraftwerken die geringe Fließgeschwindigkeit in Stauräumen zur Ablagerung von Sedimenten führt, basiert die Stauraumverlandung der hoch gelegenen Speicherseen vor allem auf dem Eintrag von Feinsedimenten (Schleiss et al. 2010), die das energiewirtschaftlich nutzbare Volumen sukzessive verringern. Die aus diesem Grund in regelmäßigen Abständen durchgeführten Stauraumpülungen zur Erhöhung des Stauraumvolumens können wiederum negative ökologische Auswirkungen zur Folge haben. So führt ein enorm erhöhter Schwebstoffeintrag im Gewässer zu akuter Sauerstoffzehrung, mechanischer Störung der Kiemen und Haut von Fischen, Verlust von Habitaten (Ablagerungen) sowie einer möglichen Zerstörung von Laichplätzen durch Versiegelung (Jungwirth et al. 2003).

Ziel des vorliegenden Fachbeitrags ist es, die ökologische Bedeutung von Feststoffen und gewässermorphologischen Strukturen im Nahbereich von Kleinwasserkraftwerken (KWKW) aufzuzeigen. Es werden sowohl die notwendigen Grundlagenhebungen (Messungen und Modellierungen) für wasserbauliche Maßnahmenplanungen

beschrieben, als auch konkret die Möglichkeiten zur naturnahen/technischen Optimierung angesprochen. Fokus liegt vor allem bei der eigendynamischen Entwicklung von Kieslaichplätzen, die ein Schlüsselhabitat in Bezug auf die nachhaltige Gewährleistung des guten ökologischen Zustands bilden.

## 2 Messungen und Modellierungen des Feststofftransports als Grundlage für die Planung und den Betrieb von Kleinwasserkraftwerken

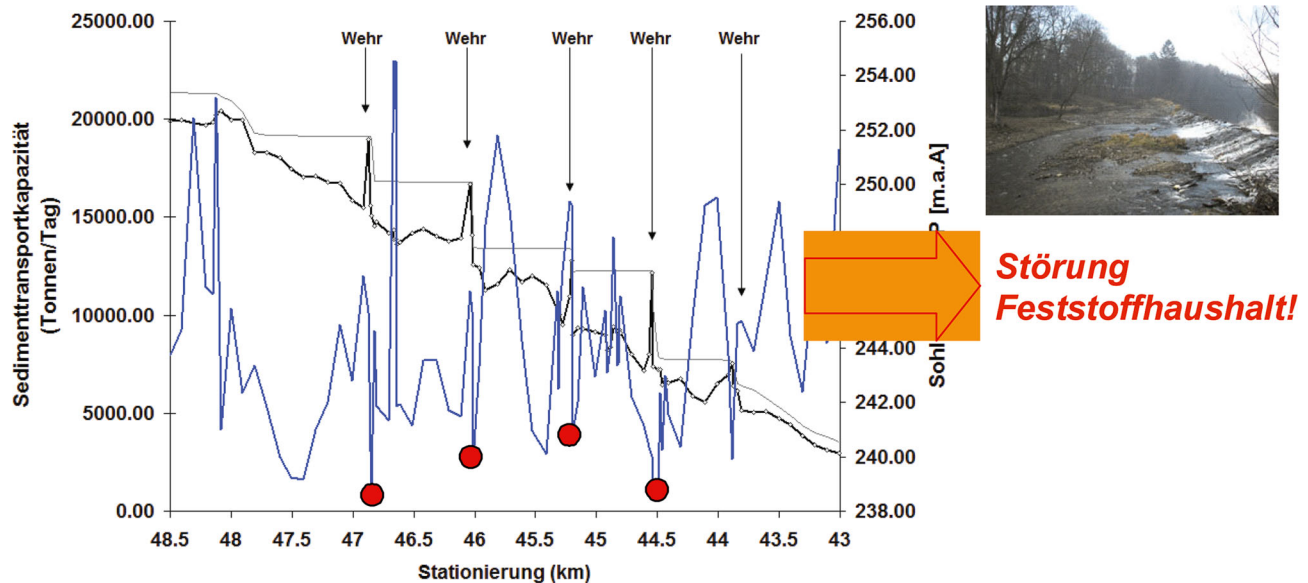
Wie bereits in der Einleitung angeführt, gewinnt der Feststofftransport für die Kleinwasserkraft an Bedeutung, denn es sind sowohl technische Aspekte wie Stauraumverlandung oder Hochwasserbeeinflussung als auch ökologischen Themen (z. B. Lebensraumveränderung) damit verbunden. Für die Berücksichtigung des Sedimenttransports und morphodynamischer Prozesse in der Planung und in weiterer Folge im Betrieb von Kleinwasserkraftwerken sind Messdaten von transportierten Feststoffen im jeweiligen Fließgewässer wichtig. Diese Daten dienen vor allem als Grundlage für die Anwendung eindimensionaler bzw. mehrdimensionaler Feststofftransportmodelle, welche in den wasserbaulichen Planungen immer häufiger verwendet werden. Der Datenbedarf für die Anwendung dieser Modelle setzt sich vor allem aus (gewässer-)morphologischen, hydraulisch-/hydrologischen und sedimentologischen Daten zusammen, wobei die Datenverfügbarkeit bzw. -qualität der morphologischen/sedimentologischen Daten meist als limitierend anzusehen ist. Die Verfügbarkeit von historischen Aufzeichnungen/Messungen über Veränderungen der Gerinnegeometrie besitzt einen hohen Stellenwert für die Kalibrierung bzw. Validierung von Sedimenttransportmodellen, da nur mit geeichten Modellen Aussagen über zukünftige Entwicklungen der Gewässermorphologie (Prognose) getroffen werden können. Als Grundlagen für die morphologische Beschreibung eines Fließgewässers dienen hier Vermessungen in Form von Querprofilen bzw. auch flächige Sohlgrundaufnahmen (z. B. Single-/Multibeam-Messungen). Weiters sind Kenntnisse über mögliche anthropogene Eingriffe notwendig. In der Modellierung selbst gilt es, den transportwirksamen Bereich abzugrenzen bzw. zu definieren und sämtli-

che Bauwerke im Untersuchungsgebiet geometrisch zu erfassen (Abb. 2). In der wasserwirtschaftlichen Praxis müssen bei Neuplanungen bzw. baulichen Veränderungen bestehender KWKW-Anlagen Nachweise über mögliche Beeinflussungen des HQ<sub>30</sub>- bzw. HQ<sub>100</sub>-Abflusses erbracht werden (z. B. Änderung des Wasserspiegels), wodurch in der Modellerstellung auch der Vorlandbereich geometrisch dokumentiert werden muss. Dies erfolgt meist in Form von (ausgedünnten) Laserscan-Daten, die für die Modellanwendung mehrdimensionaler Simulationsprogramme eine hochauflösende Darstellung der Überflutungsflächen liefern.

Um feststoffrelevante Modellierungen umsetzen zu können, ist die Kenntnis über den Sohlaufbau, der sich in Deck- und Unterschicht untergliedert, Grundvoraussetzung. Eine repräsentative Probenentnahme ist hier wesentlich, wobei vor allem auf möglichst viele räumlich verteilte Proben aus Deck- und Unterschicht, auf die Aufnahme der Sohle in Randbereichen und im Nahbereich von Einmündungen bzw. auf ausreichende Probenanzahl auf dynamischen Kiesbänken und Transportkörpern zu achten ist. Die Entnahme des Materials erfolgt meist volumetrisch (z. B. Greifer), kann aber auch vor Ort mittels Linienzahlanalyse bzw. „Wolman Count“-Methode bestimmt werden.

Neben der Eichung der modellierten Wasserspiegellagen/Fließgeschwindigkeiten für bestimmte Durchflüsse (z. B. MQ) ist die Kenntnis über den Feststoffzufluss in Menge und Zusammensetzung als Funktion der Durchflussgröße für das oberstromige Ende des Bearbeitungs-/Modellierungsgebietes Grundvoraussetzung für die Anwendung von (mehrdimensionalen) Sedimenttransportmodellen. Zusätzlich zu diesen Informationen sind für die Planung bzw. den Um- und Neubau von Kleinwasserkraftwerken Kenntnisse über Kiesentnahmen oder Geschiebedepots bzw. der Feststoffhaushalt im Jahresverlauf nach Menge und Dauer aufgeschlüsselt wünschenswert. Die gesamte Feststofffracht beinhaltet im Wesentlichen das an der Sohle transportierte Geschiebe und die in der Wassersäule transportierten Schwebstoffe, wobei der Grenzkorndurchmesser für die Trennung zwischen Geschiebe und Schwebstoff in Abhängigkeit vom Durchfluss variiert. Zum Geschiebetransport sind derzeit in Österreich einzelne Pilotanlagen mit





**Abb. 2** Darstellung der Sedimenttransportkapazitäten (HQ) bzw. Wasserspiegel (NQ) für den Ortsbereich von Gars am Kamp (Berechnungen mittels 1D-Modellierung)

Möglichkeiten der simultanen Messung im Einsatz (z. B. Drau, Isel, Donau, Urslau, Rofener Ache), wobei ein Messnetzausbau bzw. die Veröffentlichung der Geschiebedaten im Hydrografischen Jahrbuch für die Zukunft geplant ist. Zusätzlich werden als Planungsgrundlage projektsbezogene Geschiebemessungen durchgeführt (z. B. von der TIWAG an der Ruetz in Tirol). Zum Schwebstofftransport gibt es seit 2008 erstmals in Österreich Daten im Hydrografischen Jahrbuch, wobei das Basismessnetz derzeit 34 Pegelstationen umfasst (darüber hinaus erfolgen z. B. bei Stauraumpulungen Messungen, wozu z. B. der Verbund eine Vielzahl an Schwebstoffmessstellen selbst betreibt).

In der Feststofftransportmodellierung sind generell noch einige Fragen offen bzw. Prozesse noch unzureichend beschrieben, wie z. B. der Quertransport über das Profil in Krümmungen oder die numerische Implementierung der Ufererosion bei Sedimentschichten mit stark unterschiedlichen Kornverteilungen. Abgesehen von diesen Forschungsfragen zeigte die Anwendung numerischer Sedimenttransportmodelle in den letzten Jahren bereits gute Ergebnisse in Bezug auf die Prognose von Entwicklungen der Gewässersohle bzw. auch auf die Entwicklung des Gewässerlebensraums. Die Anwendung der (mehrdimensionalen) Feststoffmodellierung bietet somit die Möglichkeit, die Auswirkung des Feststofftransports auf geplante wasserbauliche Projekte, auch

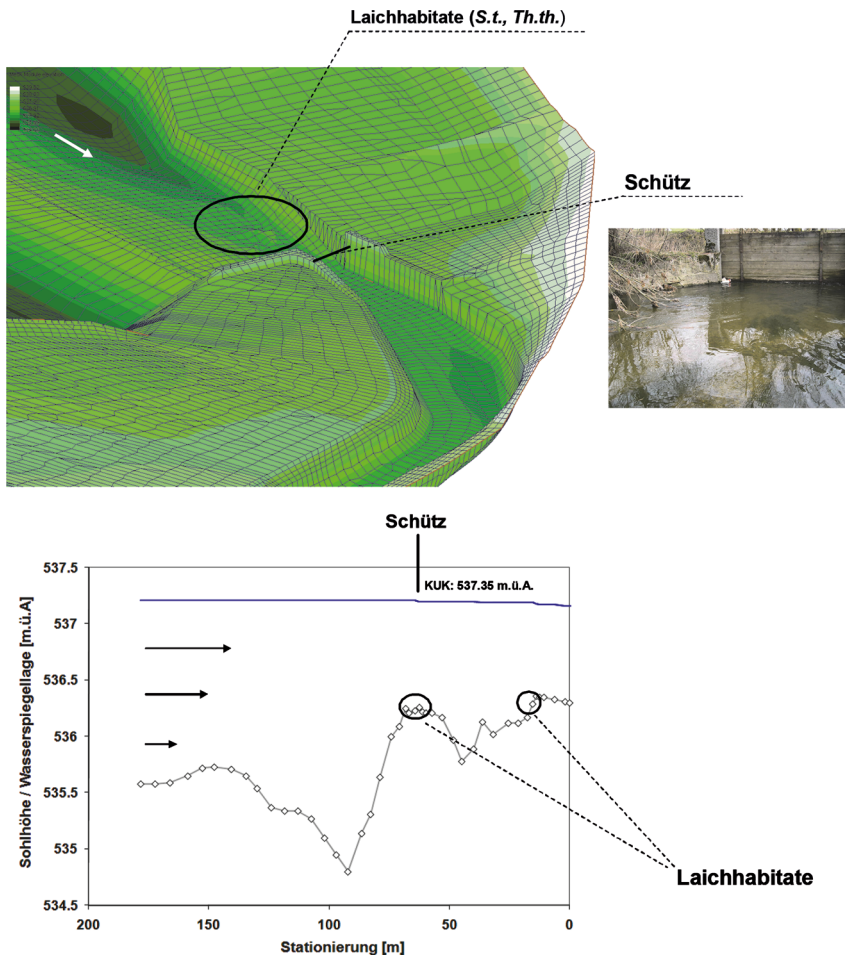
im Bereich der Kleinwasserkraftwerksprojektierung, sowie auf deren Folgen hin zu bewerten bzw. auch durch Maßnahmen zu optimieren und damit technische, wirtschaftliche und ökologische Probleme im Betrieb zu minimieren.

### 3 Ökologische Bedeutung von Feststoffen und gewässermorphologischen Strukturen im Nahbereich von Kleinwasserkraftwerken

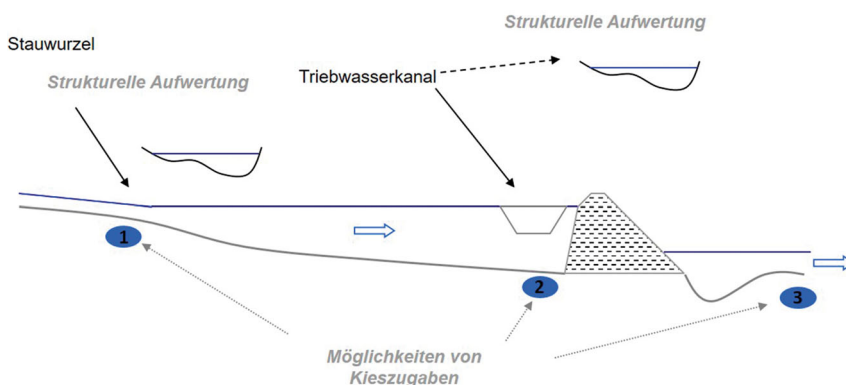
Laufkraftwerke im Allgemeinen und Kleinwasserkraftwerke im Speziellen führen zu einem lokalen Aufstau von Fließgewässern mit einer deutlichen Störung des longitudinalen Feststoffhaushalts bzw. der Sedimenttransportkapazität. Wie in Abb. 2 am Beispiel von Gars am Kamp ersichtlich, zeigt der teilweise Einstau eines Gewässers eine deutliche Abnahme der theoretischen Transportfrachten bei erhöhten Abflüssen, welche unmittelbar flussab der Querbauwerke am niedrigsten ist (rote Punkte). Dies führt zu den nach Hochwässern typischen und aus Sicht des Hochwasserschutzes teilweise problematischen Anlandungen im Bereich der Wehrkolke. Auf die längerfristigen und sich vor allem flussab negativen auswirkenden Folgen eines fehlenden Sedimentkontinuums bzw. auf Möglichkeiten des Feststoffmanagements wurde bereits in der Einleitung Bezug genommen. In diesem Teil des Fachbeitrags werden Möglichkeiten aufgezeigt,

die es ermöglichen, die veränderten hydraulischen Rahmenbedingungen zu nutzen, um eine ökologische Aufwertung des Fließgewässers an und im Nahbereich von Kleinwasserkraftwerken durchzuführen. Vor allem auf die Reproduktionsbereiche von kieslaichenden Fischen wird dabei im Speziellen eingegangen. Einerseits wird durch eine Verbesserung der Durchgängigkeit (Fischaufstiegshilfen – FAH) die longitudinale (Laich-)Wanderung in einem Fließgewässer ermöglicht bzw. gelten Kieslaichplätze allgemein als entscheidend für den erfolgreichen Aufbau und Erhalt im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie (Hauer et al. 2013).

Als wesentlichste Voraussetzung für die erfolgreiche Reproduktion von Salmoniden (lachsartigen Fischen) ist das Vorhandensein von kieseligen Sohlsubstrat zu nennen. Vor allem Salmoniden (Forellen, Lachse, Huchen, Saiblinge und Äschen) bringen ihre Eier aktiv in den Schotterkörper ein und werden der ökologischen Gilde der Interstitiallaicher zugeordnet (Pulg 2009). Durchlässiger, locker gelagerter Kies ist die Grundvoraussetzung dafür, dass abgelegte Eier genannter Gattungen ausreichend von Wasser umspült und so mit Sauerstoff versorgt bzw. auch Stoffwechselausscheidungen abtransportiert werden. Neben den Salmoniden laichen die sogenannten rheophilen Cypriniden (Nasen, Barben) auf Kiesuntergrund, welche aber nicht in, sondern auf das Sohlsubstrat ablaichen



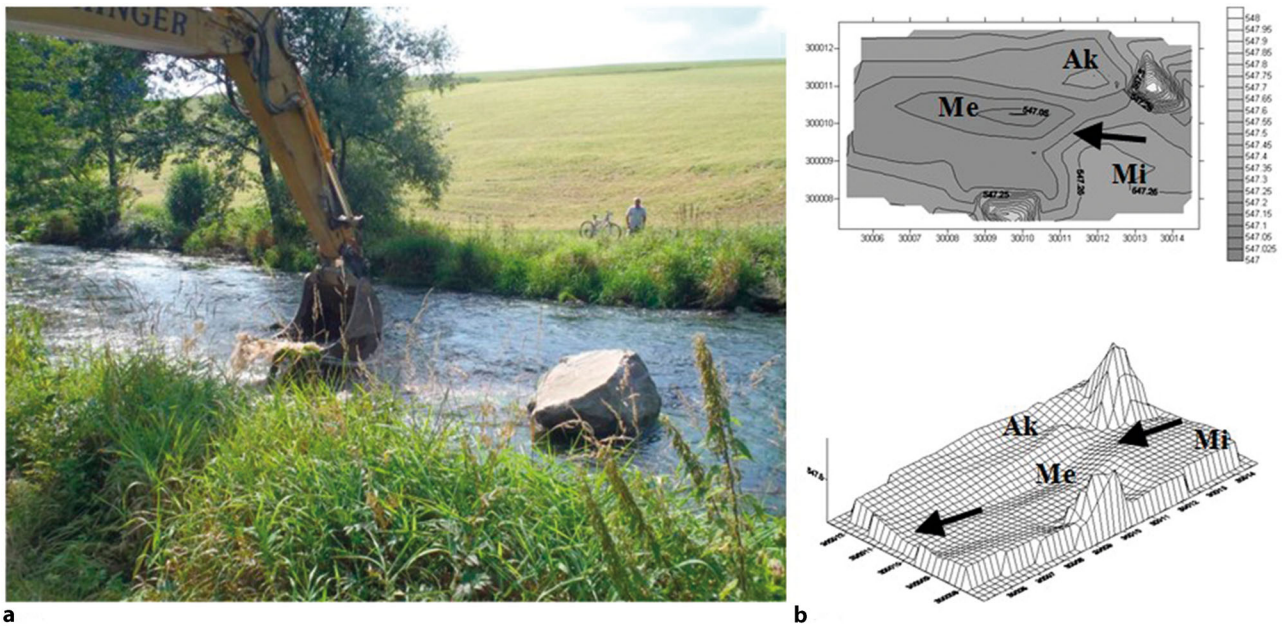
**Abb. 3** (a) Hochauflösendes Geländemodell einer Kleinwasserkraftwerks-Anlage an der Großen Mühl (Laichhabitate von Bachforellen und Äschen eingezeichnet); (b) Längenschnitt des Beispieldraftwerks von Stauraum und Teilen des Triebwasserkanals



**Abb. 4** Schematischer Längenschnitt eines beeinflussten Fließgewässerabschnittes durch einen Kleinwasserkraftwerksstandort mit Möglichkeiten zur Verbesserung der Lebensraumstruktur bzw. Rahmenbedingungen für die Reproduktion kieslaichender Fische

(Substratlaicher). In Fließgewässern des österreichischen Alpenvorlandes (z. B. Alm, Ybbs) mit teils großem, noch unverbautem Geschiebeeinwurf in den oberen Einzugsgebieten ist die Verfügbarkeit von nutzbarem Laichkies (maßgeblicher Korndurchmesser  $d_m = 5$  bis  $50$  mm, Kondolf 2000) in den freien Fließstrecken mit einem Prozentanteil von 80 bis 100 % sehr hoch. Im Unterschied dazu zeigen Flüsse des kristallinen Grundgebirges des Flachbrett-Typs meist einen Mangel an nutzbarem Sohlssubstrat für kieslaichende Fische (z. B. Mühlviertel). In diesen Fließgewässern liegen oft 80 bis 90 % der Gewässersohle als nicht nutzbares, sehr grobes, meist ungerundetes Geschiebe vor (vgl. auch Hauer et al. 2016, in diesem Heft). Vor allem in Fließgewässern mit starken anthropogenen Beeinträchtigungen (z. B. erheblich veränderte Wasserkörper) wird die Restrukturierung von Kieslaichplätzen, auch mittels Geschiebezugabe, als wesentliches Instrument der Lebensraumverbesserung gesehen (Hauer et al. 2013).

Im Bereich von Kleinwasserkraftwerken sind in der Betrachtung des Längsschnitts drei Punkte für mögliche Laichplatzrestrukturierungen von zentraler Bedeutung (Abb. 3). In allen genannten Bereichen sind die benötigten erhöhten sohnnahe Fließgeschwindigkeiten ( $0,2$  bis  $0,4 \text{ ms}^{-1}$ ) für eine optimale Durchströmung des Laichkieses möglich. Voraussetzung für eine Nutzung des Punktes 2 (Abb. 3) im Bereich des Einlaufs in den Triebwasserkanal ist jedoch eine lokale Erhöhung der Stauraumgeometrie, die trotz des Einflusses des Wehrbauwerks aufgrund der Kontinuitätsbeziehung die Fließgeschwindigkeiten erhöht (Abb. 3). Untersuchungen an sich eigendynamisch entwickelnden Laichplätzen von Bachforelle und Äsche an einem Kleinwasserkraftwerk der Großen Mühl zeigten (Abb. 2), dass diese Bereiche ohne betriebstechnische Einschränkungen über Jahre hinweg als Reproduktionsflächen genutzt werden konnten (Hauer et al. 2011). Der unmittelbare Nahbereich zum oberstromigen Ende von FAH ist hier zusätzlich positiv hervorzuheben. Weiters sind in Bereichen des Wehrkolks (auch hier besteht Nähe zu FAH) bzw. auch im Bereich der Stauwurzel Verbesserungen für die Reproduktion von kieslaichenden Fischen möglich. Dies kann zum Teil eigendynamisch im Bereich der Stauwurzel bzw. durch Geschiebezugabe oder Pflegemaßnahmen



**Abb. 5** Umsetzung einer leitbildkonformen Restrukturierung an der Großen Mühle durch das Einbringen von Granitblöcken (2 bis 3 Tonnen) in Zusammenarbeit mit dem Gewässerbezirk Grieskirchen; (b) Digitales Höhenmodell eines Detailbereichs der Großen Mühle, in den 2 Granitblöcke (2 bis 3 Tonnen) eingebracht wurden. Das Höhenmodell zeigt die eigendynamische Entwicklung nach einem Jahr; schwarze Pfeile zeigen die Fließrichtung; A = Akal ( $d_m = 2 \text{ mm bis } 2 \text{ cm}$ ), Mi = Mikrolithal ( $d_m = 2 \text{ cm bis } 6,3 \text{ cm}$ ), Me = Mesolithal ( $d_m = 6,3 \text{ cm bis } 20 \text{ cm}$ )

(mechanische Auflockerungen des Substrats) im Bereich der Stauwurzel erfolgen. Für die Restrukturierung von Kieslaichplätzen im Nahbereich von Kleinwasserkraftwerken sind aber sämtliche betriebstechnische und hochwasserschutzrelevante Aspekte in der Planung und Ausführung zu beachten.

In Bezug auf die Bewertung gewässermorphologischer Strukturen besitzen Ausleitungskraftwerke neben den charakteristischen Ausleitungs-/Restwassertrecken, welche gemäß QZVÖ (2010) mit einer ausreichenden Wassermenge zu dotieren sind, Triebwasserkanäle (Mühlbäche) im Oberwasserbereich, die dem Kraftwerk (Turbine) das Wasser gezielt zuführen. Durch Einlaufschütze sind diese künstlichen Nebengewässer vor Hochwasserwellen und Eisstoß geschützt und bieten vor allem bei extremen Niederwasserphasen ausreichende Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten für Adultfische (z. B. Äsche). Obwohl die Sohldynamik und das Längskontinuum für Feststoffe als essenziell für ein Gewässerökosystem anzusehen sind (z. B. Hauer et al. 2013), sind es vor allem die stabilen Verhältnisse der Gewässersohle (Hochwassersicherheit) in den Triebwasserkanälen, die z. B. für die Flussperlmuschel bzw. auch teilweise für

kieslaichende Fische kleinräumige Refugialhabitate bilden können. Um diese Vorteile an Kleinwasserkraftwerksanlagen zu erreichen, muss aber von allzu technischen Ausführungen der Triebwasserkanäle Abstand genommen werden. Wo die Möglichkeit besteht (ausreichende Länge des Triebwasserkanals), sollen heterogene naturnahe Uferlinien ermöglicht werden, um das Gewässer strukturell aufzuwerten bzw. vor allem die längerfristige Strukturierung der Sohle mit ihren wichtigen biologischen Funktionen zu ermöglichen. Eingeschwemmte (befestigte!) Baumstrukturen können dabei die Wirksamkeit und Strukturvielfalt noch zusätzlich optimieren. Bei all diesen ökologischen Verbesserungen sind aber betriebstechnische Aspekte (z. B. Sicherheit der Anlage, mögliche hydraulische Verluste) zu beachten bzw. ist diesen in der Umsetzung und Bewertung der eigendynamischen Entwicklung Rechnung zu tragen (Abb. 4).

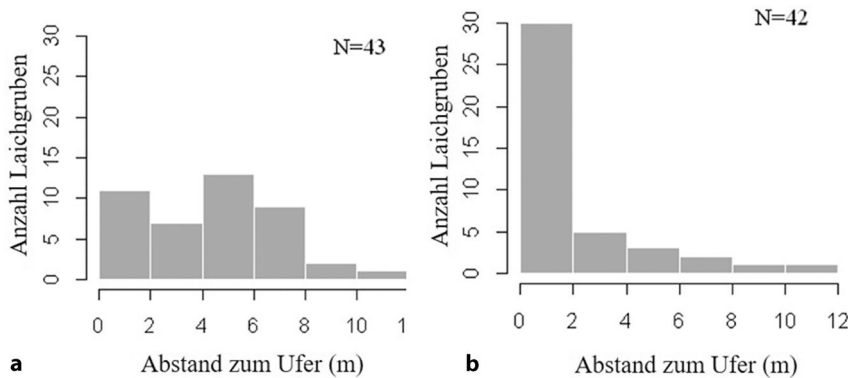
Aufgrund der hydraulischen Verhältnisse Fließgeschwindigkeit/Sohlschubspannung und der damit in Beziehung stehenden Drift von Fischnährtieren (Makrozoobenthos) werden in Stau-bereichen von Kleinwasserkraftwerken (> 100 m) mitunter ca. 30 % der Staulänge von driftfressenden Salmoniden

(z. B. Bachforelle, Äsche) als Lebensraum genutzt. In diesen Bereichen, mit noch teils moderaten Fließgeschwindigkeiten, kann – neben einer aktiven Laichplatzverbesserung – eine Verbesserung der Lebensraumsituation für Leitarten und Begleitarten gemäß BM-LFUW (2010) durch strukturelle Aufwertungen der Gerinnemorphologie erzielt werden. Aufweitungen im Stauwurzelbereich haben hier vor allem eine Reduktion der Geschiebetransportkapazitäten zur Folge, welche zu verstärkter Sedimentation, auch von nutzbarem Laichkies, führen kann bzw. die morphologische Heterogenität erhöhen (z. B. Breiten-/Tiefenvarianz). Strukturierungen im Allgemeinen haben jedoch im Flussbau die Hochwassersicherheit von Infrastruktur und Siedlungsobjekten zu beachten (Abb. 5).

#### 4 Validierung der Laichplatznutzung

Im Zuge wissenschaftlicher Untersuchungen wurden im Zeitraum Dezember 2013 und Jänner 2014 Bachforellenlaichplätze (*Salmo trutta* ff.) im Einflussbereich von Kleinwasserkraftwerken an der Großen Mühle (Oberösterreich) unmittelbar nach deren Laichzeit (endet in diesen kristallinen Fließge-





**Abb. 6** Histogramme der Abstände von Kieslaichplätzen zur nächstgelegenen Uferkante bzw. Wasseranslagslinie: (a) Regenbogenforellenlaichplätze (Große Erlauf); (b) Bachforellenlaichplätze (Große Mühl)

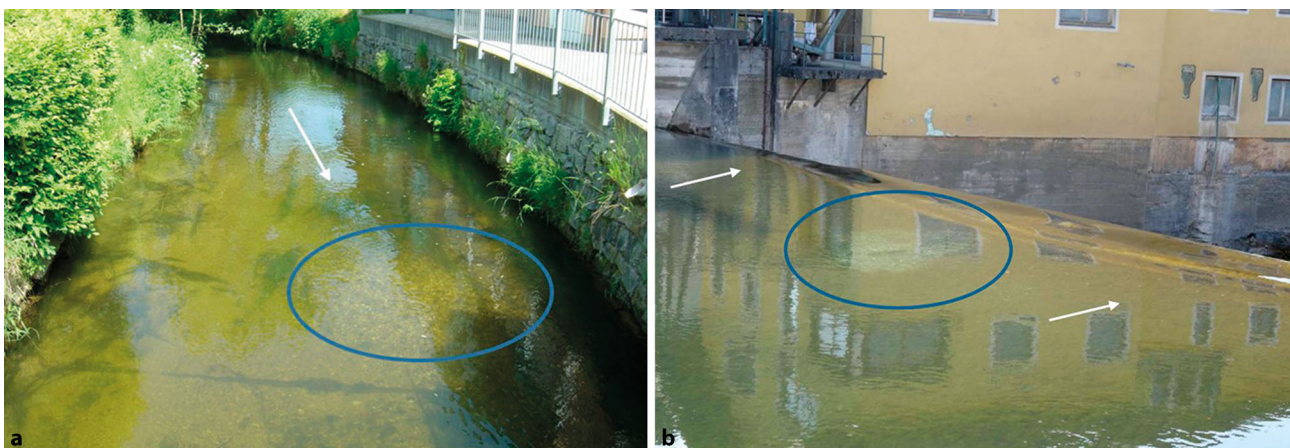
wässern meist mit Anfang Dezember) aufgenommen. Zusätzlich wurde die Laichplatznutzung der Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*) in der Erlauf, einem Voralpenfluss, im Zeitraum März bis April 2014 erhoben. Ziel war es, bei Ausleitungskraftwerken die Möglichkeiten für ein Abbläuen im Nahbereich der Wasserkraftanlagen unter Berücksichtigung von lokaler hydraulischer und sedimentologischer Variabilität zu dokumentieren. Aufgrund der Bedeutung der Kleinräumigkeit von heterogenen Strömungsverhältnissen wurde neben der GPS-Verortung und der Vermessung der Laichplatzgröße (Länge, Breite) auch ein räumlicher Bezug zu Gewässerstrukturen untersucht. In Anlehnung an die Arbeit von Witzel und MacCrimmon (1983) wurde hier zwischen Blockstrukturen (Durchmesser > 0,3 m), Makrophyten (Durchmesser > 0,5 m) und Totholz (Durchmesser

> 0,5 m) unterschieden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden von Obruca und Hauer (2016) veröffentlicht und sind im Folgenden kurz zusammengefasst.

In Summe wurden 42 Bachforellenlaichplätze an der Großen Mühl und 43 Regenbogenforellenlaichplätze an der Erlauf aufgenommen. Auffallend war, dass die meisten Bachforellenlaichplätze innerhalb von 2 m zur nächsten Uferkante angelegt wurden. Die Laichplätze der Regenbogenforelle hingegen waren über den gesamten aktiven benetzten Gewässerquerschnitt verteilt (Abstand von 4 bis 6 m zur nächsten Uferkante) (Abb. 6). Diese Unterschiede in der Laichplatzsituation hängen einerseits mit der Verfügbarkeit von geeignetem Laichsubstrat zusammen, welches in der Großen Mühl aufgrund der geomorphologischen Rahmenbedingungen limitiert

ist, andererseits auch mit dem sehr starken Strukturbezug von Bachforellen (83 % der Laichgruben hatten einen Strukturbezug). Der Nahbereich zu Blockstrukturen hatte mit 35 % aller dokumentierten Laichgruben (n = 42) die größte Nutzung, gefolgt von Makrophyten (26,2 %), zu weiteren Laichgruben (23,8 %) und Totholz (2 %). Die dokumentierten Laichplätze der Regenbogenforelle an der Erlauf zeigten nur in 18,6 % der Fälle einen räumlichen Bezug zu Strukturen (Blockstrukturen: n = 4/weitere Laichgruben: n = 4).

Im Zuge der Evaluierung des Einflusses von Kleinwasserkraftwerken auf die Laichplatzwahl konnte festgehalten werden, dass sowohl für die Bachforelle als auch für die Regenbogenforelle ein Abbläuen im durch die Wasserkraftanlagen hydraulisch beeinflussten Bereich erfolgte. Dies betrifft sowohl den unterhalb der Wehranlage forcierten Ablagerungsbereich (vgl. diesbzgl. Abb. 2) als auch Teile des Staauraums (Abb. 7a) und des Triebwasserkanals (Abb. 7b). In allen drei Bereichen wurde locker gelagerter Laichkies ( $d_m = 5$  bis 50 mm) in Kombination mit geeigneten sohnahen Fließgeschwindigkeiten (0,2 bis 0,4  $\text{ms}^{-1}$ ) dokumentiert. Generell muss jedoch bei den in diesem Fachbeitrag präsentierten Ergebnissen betont werden, dass die Dokumentation von Laichgruben nicht mit dem Reproduktionserfolg bzw. auch mit dem erfolgten Einbringen von Eiern gleichzusetzen ist. Um dies zu dokumentieren, müsste eine Öffnung der Laichplätze z. B. im Augenpunktstadium erfolgen, was aber nicht Teil der Untersuchungen von Obruca und Hauer (2016) war.



**Abb. 7** Fotos von Bachforellen und Regenbogenforellenlaichplätzen (in Blau umrandet) im Nahbereich von Kleinwasserkraftanlagen: (a) Bachforellenlaichplatz in einem Triebwasserkanal an der Gr. Mühl (OO); (b) Regenbogenforellenlaichplatz an einer überströmten Wehrkante in einem verlandeten Staauraum der Gr. Erlauf (NO), weiße Pfeile = Fließrichtung

## 5 Diskussion

Unabhängig von der notwendigen Einzelfallbetrachtung in konkreten konstruktiven Wasserbau- bzw. Kraftwerksprojekten sollte der generelle Lösungsansatz zur Verbesserung der Sedimentdurchgängigkeit in der Flussgebietsplanung und einer integralen Wasserwirtschaft basieren (Habersack et al. 2014). Von der Wildbach- und Lawinerverbauung über die Bundeswasserbauverwaltung sowie Wasserstraßenverwaltung bis zur Energiewirtschaft sollten abgestimmte Maßnahmen zur Verbesserung des Feststoffhaushalts und der Flussmorphologie geplant und umgesetzt werden. Diese beinhalten die Erosion im Bereich der Geschiebequellen, den Transfer in den Bächen und Flüssen sowie die Sedimentation und Remobilisierung in den Fließgewässern, aber auch Stauräumen etc. Dazu bedarf es Vorgaben insbesondere für den Neubau oder die Sanierung/Optimierung von energie- und schutzwasserwirtschaftlichen Einrichtungen oder Bauwerken. Es ist zu erwarten, dass ein gezielter Mitteleinsatz in diesem Bereich zu nachhaltigeren Lösungen und einer effektiven, nachhaltigen Investition führt. Umgekehrt werden mitunter viele kleinräumige Maßnahmen mit hohem finanziellen Einsatz bei Nichtbeachtung des Feststoffhaushalts und der damit zusammenhängenden Flussmorphologie langfristig nicht den gewünschten positiven Effekt erzielen. Erst wenn das „Rückgrat“ der Flüsse funktioniert, können kleinräumige Strukturierungsmaßnahmen langfristig positive Wirkung zeigen (Habersack et al. 2014).

In der Diskussion über zukünftige Investitionen gilt es weiters festzuhalten, dass Gestaltungsmaßnahmen im Bereich des naturnahen Wasserbaus mitunter erodiert oder mit Sedimenten überlagert werden, ihre hydraulische Wirksamkeit verlieren und somit Investitionen mitunter nicht nachhaltig erfolgreich sind (Hauer et al. 2008). Eine nachhaltige Verbesserung der Habitatqualität und letztendlich die flussmorphologische Dynamik hängen sowohl vom übergeordneten Feststoffhaushalt (Hauer 2015) als auch von anthropogenen Störungen der Wirkungszusammenhänge Erosion, Transport und Ablagerung ab (Wagner et al. 2015). Hier reduzieren Kleinwasserkraftanlagen, neben einer Unterbrechung der

Wandermöglichkeit für Gewässerorganismen, ab einer bestimmten Staulänge die Feststoffdynamik wesentlich. Neben der Staulänge ist vor allem auch der Füllungsgrad des Stauriums entscheidend für die Größenordnung der Störung des aquatischen Lebensraums. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigten aber auch, dass hydromorphologische Verbesserungen (technisch und eigendynamisch) zur Verbesserung der Laichplatzqualität von Salmoniden im Nahbereich von Kleinwasserkraftwerksanlagen möglich sind. Neben einer ausreichenden Restwasserführung bzw. Wassertiefe (Crisp 1993) während der Laichzeit, können auch durch gezielte Verlandungen der Stauräume neue Laichmöglichkeiten geschaffen werden (Obruca und Hauer 2016). Vorausgesetzt wird hierbei die Gewährleistung des Hochwasserschutzes und eine entsprechende Zufuhr von Feststoffen (Geschiebe) aus den flussauf gelegenen Einzugsgebieten. Weiters kann das zielgerichtete und hydraulisch abgestimmte Einbringen von Strukturelementen (Totholz, Blöcke) eine Verbesserung hinsichtlich Substratsortierung und Strömungsverhältnissen bzw. Sichtschutz (Bachforle) nach sich ziehen (Witzel und MacCrimmon 1983).

## 6 Schlussfolgerungen

Aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und bereits zahlreichen Veröffentlichungen zu den Themen Feststoffhaushalt und Wasserkraftnutzung ist eine grundsätzliche Betrachtung des Feststoffhaushalts und der Flussmorphologie im Flussgebietsbewirtschaftungsplan essenziell für eine nachhaltige Planung und Umsetzung von Rückbaumaßnahmen zur Erreichung eines guten ökologischen Zustands, aber auch zum langfristigen Erhalt desselben (vgl. auch König und Hauer 2016, in diesem Heft). Hier bestehen unmittelbare Zusammenhänge und Koordinierungsbedarf mit dem Hochwasserschutz, der ebenfalls von den langfristigen Entwicklungen betroffen ist und mit den eigenen Maßnahmen Einfluss auf die Hydromorphologie und damit den ökologischen Zustand ausübt. Weiters ist auch die Energiewirtschaft gefordert, der Sedimentdurchgängigkeit bei neuen Planungen und Anpassungen stärkeres Gewicht zu geben. Grundsätzlich gibt es viele Möglichkeiten des Stau-

raummanagements betreffend Feststoffdurchgängigkeit, wobei u. a. eine Optimierung zwischen technischen, ökonomischen und ökologischen Kriterien erforderlich ist. Es besteht noch großer Forschungsbedarf, um eine Optimierung des Stauraummanagements hinsichtlich Sedimentdurchgängigkeit oder zumindest Verringerung der Sedimentation zu erreichen. Insbesondere bei Kleinwasserkraftwerken besteht aufgrund der geringen Fallhöhen, Ausführung der Wehranlagen etc. häufig eine geringere Unterbrechung des Feststoffkontinuums. Allgemein ist die Energiewirtschaft gefordert, der Sedimentdurchgängigkeit bei neuen Planungen und Anpassungen stärkeres Gewicht zu geben. Dazu gehört auch die Entwicklung von Planungskriterien und Maßnahmen, die eine Optimierung von Anlagen z. B. im Bereich der Wasserkraft hinsichtlich Verbesserung des Sedimentkontinuums ermöglichen und gleichzeitig die vorgesehenen Nutzungen der Anlagen zulassen. Möglichkeiten, um diese integrativen Lösungen zu erarbeiten, bieten physikalische Modellversuche bzw. ein- und mehrdimensionale hydrodynamisch-numerische (Feststofftransport-)Modelle.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass unter der Berücksichtigung von betriebstechnischen und hochwasserschutzrelevanten Aspekten Restrukturierungen im Nahbereich von Kleinwasserkraftwerken möglich sind, wobei vor allem feststoffrelevante Aspekte wie die Schaffung von neuen Kieslaichplätzen Möglichkeiten der Verbesserung der Gewässerökologie bieten. Diese Möglichkeiten sollten vor allem bei der Neuerrichtung bzw. Umbau und Adaption bestehender Anlagen berücksichtigt werden.

Open access funding provided by University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU).

### Interessenkonflikt

C. Hauer, W. Obruca, B. Wagner und H. Habersack geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung,



Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Au-

tor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Com-

mons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. ■

## Literatur

- BMLFUW (2010):** Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan Österreich, BMLFUW-UW, 4.1.2/0011-1/4/2010.
- De Cesare, G., Schleiss, A., Hermann, F. (2001):** Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Engineering* 127(1): 6–16.
- Crisp, D. T. (1993):** The environmental requirements of salmon and trout in fresh water. In *Freshwater Forum* 3(3): 176–202.
- Habersack, H., Liedermann, M., Tritthart, M., Gmeiner, P., Haimann, M., Hauer, C., Klösch, M., Schober, B. (2009):** Flussbauliches Gesamtprojekt Donau östlich von Wien, Endbericht Premonitoring Naturversuchsstrecke Bad Deutsch Altenburg Messprogramm 2005–2009, im Auftrag von via donau and BMVIT, 1151 Seiten.
- Habersack, H., Wagner, B., Hauer, C., Jäger, E., Krapesch, G., Strahlhofer, L., Volleritsch, M., Holzappel, P., Schmutz, S., Schinegger, R., Pletterbauer, E., Formayer, H., Gerersdorfer, T., Pospichal, B., Prettenhaler, F., Steiner, D., Köberl, J., Rogler, N. (2011):** DSS\_KLIM:EN: Entwicklung eines Decision Support Systems zur Beurteilung des Wechselwirkungen zwischen Klimawandel, Energie aus Wasserkraft und Ökologie. *Kommunalkredit Austria AG*, gefördert vom Klima- und Energiefonds, 132.
- Habersack, H., Blamauer, B., Villwock, H., Prenner, D., Schoder, A., Kreisler, A., Klösch, M., Hauer, C. (2014):** SED\_AT – Feststoffhaushalt, Sedimenttransport und Flussmorphologie im Rahmen des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans. Vienna, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 131 S.
- Habersack, H., Blamauer, B., Villwock, H., Prenner, D., Hauer, C. (2014):** SED\_AT – Feststoffhaushalt, Sedimenttransport und Flussmorphologie im Rahmen des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 66: 327. [10.1007/s00506-014-0176-9](https://doi.org/10.1007/s00506-014-0176-9)
- Hauer, C. (2015):** Review of hydro-morphological management criteria on a river basin scale for preservation and restoration of freshwater pearl mussel habitats. *Limnologia* 50: 40–53
- Hauer, C., Unfer, G., Schmutz, S., Habersack, H. (2008):** Morphodynamic effects on the habitat of juvenile cyprinids (*Chondrostoma nasus*) in a restored Austrian lowland river. *Environ Manage.* 42(2): 279–296.
- Hauer, C., Unfer, G., Tritthart, M., Habersack, H. (2011):** Effects of stream channel morphology, transport processes and effective discharge on salmonid spawning habitats. *Earth Surface Processes and Landforms* 36: 672–685.
- Hauer, C., Unfer, G., Habersack, H., Pulg, U., Schnell, J. (2013):** Bedeutung von Flussmorphologie und Sedimenttransport in Bezug auf die Qualität und Nachhaltigkeit von Kieslaichplätzen. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 4/13: 189–197.
- Hauer, C., Obruca, W., Wagner, B., Habersack, H. (2016):** Ökologische Bedeutung von Feststoffen und gewässermorphologischen Strukturen im Nahbereich von Kleinwasserkraftwerken. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 11–12.
- Höfler, S., Gumpinger, C., Hauer, C. (2016):** Ökologische Maßnahmen an kleinen und mittelgroßen Fließgewässern – Auswirkungen auf die Qualitätselemente der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie und Grenzen der Wirksamkeit – unter besonderer Berücksichtigung der Feinsedimentproblematik. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 11–12
- Jungwirth, M., Haidvogel, G., Moog, O., Muhar, S., Schmutz, S. (2003):** Angewandte Fischökologie an Fließgewässern. *Facultas Universitätsverlag, Wien*, ISBN 3-8252-2113-X.
- Kondolf, G. M. (2000):** Assessing Salmonid Spawning Gravel Quality, *Transactions of the American Fisheries Society* 129: 262–281.
- König, K., Hauer, C. (2016):** Bewertung der österreichischen Gewässerentwicklungskonzepte im Rahmen der Umsetzungsziele der EU-Richtlinien WRRL (2000/60/EG) und HWRL (2007/60/EG). *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. [10.1007/s00506-016-0347-y](https://doi.org/10.1007/s00506-016-0347-y).
- Obruca, W., Hauer, C. (2016):** Abiotic Characterization of Brown Trout (*Salmo trutta* f. fario) and Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Spawning Redds Affected by Small Hydropower Plants – Case Studies from Austria. *River Research and Application*, early view.
- Pulg, U. (2009):** Laichplätze der Bachforelle (*Salmo trutta*) in der Moosach – die Bewertung ihrer Funktionsfähigkeit, ihre Degradierung und ihre Restaurierung. Dissertation am Lehrstuhl für Landschaftsökologie der Technischen Universität München. München.
- QZVÖ (Qualitätszielverordnung Ökologie) (2010):** Bundesgesetzblatt der Republik Österreich. 10 pp.
- Schleiss, A., De Cesare, G., Jenzer Althaus, J. (2010):** Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. *Wasser Energie Luft* 102(1): 31–40.
- Wagner, B., Hauer, C., Schoder, A., Habersack, H. (2015):** A review of hydropower in Austria: Past, present and future development. *Renew Sustain Energy Rev.* 50: 304–314.
- Witzel, L., MacCrimmon, H. (1983):** Redd-site selection by brook trout and brown trout in southwestern Ontario streams. *Transactions of the American Fisheries Society* 112: 760–771.